



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102015030570-2 A2

(22) Data do Depósito: 07/12/2015

(43) Data da Publicação: 01/03/2017



(54) Título: MEIO DE ARMAZENAMENTO
MAGNÉTICO DE ALTA DENSIDADE

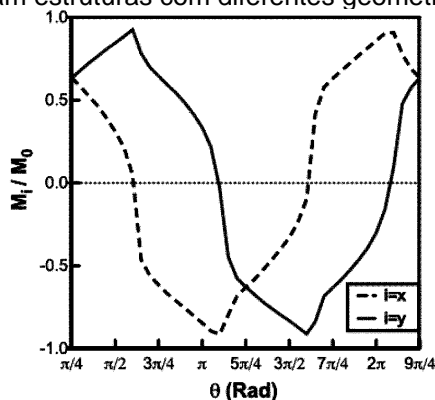
(51) Int. Cl.: G01R 33/02; G11B 5/706

(30) Prioridade Unionista: 12/12/2014 CL 3384-
2014

(73) Titular(es): UNIVERSIDAD DE SANTIAGO
DE CHILE, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
DE JANEIRO

(72) Inventor(es): JOSÉ D'ALBUQUERQUE E
CASTRO; MONICA PEREIRA BAHIANA; DORA
ROSA ALTBIR DRULLINSKY; ROBERTO
ALEJANDRO ESCOBAR DONOSO;
SEBASTIÁN EDUARDO ALLENDE PRIETO;
NICOLAS MANUEL VARGAS AYALA;
SEBASTIÁN RODRIGO CASTILLO
SEPÚLVEDA

(57) Resumo: MEIO DE ARMAZENAMENTO
MAGNETICO DE ALTA DENSIDADE Meio de
armazenamento magnético de alta densidade
constituído por particulhas ferromagnéticas de
baixa simetria, nos quais as pa?iculas são
formadas por segmentos ou barras, ou por
sistemas de barras e combinagées destas, que
foram estruturas com diferentes geometrias.



Relatório Descritivo**MEIO DE ARMAZENAMENTO MAGNÉTICO DE ALTA DENSIDADE****Campo de aplicação**

[0001] O presente invento trata da existência de configurações magnéticas de equilíbrio em partículas ferromagnéticas de baixa simetria. A condição de baixa simetria decorre do baixo número de operações de simetria, tais como rotações e reflexões, que o objeto apresenta, mantendo sua orientação espacial inalterada. Entre tais sistemas estão aqueles formados por segmentos ou barras, ou por sistemas de barras ou combinações destas, formando estruturas com distintas simetrias. Essas estruturas, as quais apresentam uma forte anisotropia configuracional, são ilustradas em detalhes por um estudo de uma estrutura do tipo T. A propósito, encontrou-se que estas estruturas apresentam quatro estados magnéticos de equilíbrio, cuja estabilidade frente a flutuações magnéticas a temperatura ambiente foi analisada. Também se considerou a presença nesses sistemas de imperfeições estruturais tais como rugosidade, que se observou não afetar de forma significativa o comportamento magnético de tais partículas. A presente invenção se destina ao campo de armazenamento magnético de informação, permitindo a gravação de mais de um bit por elemento, resultando em sistemas de gravação quartenária ou maior. O exemplo apresentado permite a gravação de dois bits por elemento, ou seja, gravação quartenária. As aplicações da invenção incluem memória magnética, sistemas de armazenamento magnético, sensores e sistemas lógicos.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

[0002] Ao longo das últimas décadas, esforços significativos vêm sendo feitos visando a produção de meios de armazenamento magnético de alta densidade. A estratégia que vem sendo usualmente adotada é a de reduzir o tamanho dos elementos de memória de modo a aumentar a densidade de armazenamento. Os elementos de memória podem ser nano-fios, nano-tubos ou nano-anéis, os quais exibem dois estados magnéticos estáveis, permitindo armazenar um bit de informação em cada um. No entanto, essa estratégia está limitada pela instabilidade térmica, a qual torna-se mais importante quando o tamanho do elemento de memória é reduzido, um efeito conhecido como superparamagnetismo. A fim de assegurar a estabilidade de um estado magnético durante um longo período de tempo (por exemplo, várias décadas) a temperatura ambiente, se necessita valores extremamente grandes de anisotropia quando o tamanho dos elementos de memória alcançam a escala manométrica.

[0003] Uma solução alternativa consiste em aumentar o número de estados magnéticos por elemento de memória. Neste sentido, dois caminhos têm sido propostos. Um baseia-se no uso de partículas constituídos por multicamadas magnéticas, que apresentam simultaneamente mais de dois estados magnéticos. O outro consiste em explorar a anisotropia configuracional magnética em partículas de diversas formas. Exemplos de tais partículas são as com a forma de triângulos, quadrados e pentágonos, que exibem simetrias de ordem seis, quatro e dez, respectivamente. Tais estruturas ilustram a relação entre a anisotropia configuracional e a forma das partículas. Desta forma, sob o ponto de vista de seu uso como elemento de memória, duas questões são levantadas. A primeira se refere à estabilidade magnética dos estados de equilíbrio. Em outras palavras, o custo em

energia para passar de um estado a outro, resultando numa possível perda de informação. A segunda questão se refere à robustez dos estados de equilíbrio frente a imperfeições estruturais, como rugosidades.

[0004] Hoje em dia, dependendo do potencial de aplicação e da área de investigação, o estado da arte em materiais magnéticos permite que uma ampla variedade de geometrias, tamanho e materiais sejam encontradas. Embora seja impossível detalhar as características de cada sistema magnético existente na literatura, é possível mencionar algumas estruturas que apresentam características próximas em termos magnéticos e/ou geométricos da invenção proposta. Um exemplo de uma tal sistema é a fabricação de estruturas magnéticas de ferro com a forma de um T projetadas para o transporte eletrônico dependente de variações na resistência elétrica devidas a campos magnéticos externos ["The research of magnetic contrast size dependence in epitaxial iron nanostructures", L. A. Formin, J. V. Malikov, and G. M. Mikhailov, SPM-2003, Proceedings Nizhi Novgorov, March 2-5 2003, P. 126]. Esta proposta focaliza a análise de tais sistemas com o propósito de utilizá-los como um possíveis sistemas de transporte eletrônico, especificamente vinculado ao efeito de magnetoresistência gigante. Nela não é feita referência à configuração de domínios nem dos estados magnéticos que o sistema poderia apresentar. Somente é feita menção à formação de paredes de domínios, configuração de modo geral presente nos sistemas magnéticos. Por último, cabe mencionar que se trata de amostras de tamanho micrométrico.

[0005] Outra publicação relacionada com a presente invenção é a tese "Interacción dipolar entre sistemas magnéticos micro e nanométricos", Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile, 2007, do candidato a doutor, Juan Escrig. Nessa tese se descreve o comportamento magnético

bem como os estados de menor energia de diversas nanopartículas. Especificamente se analisa o papel da interação dipolar entre as partículas como função da geometria e tamanho. Os sistemas focalizados nessa tese são arranjos de nanocilindros magnéticos, estudando-se o papel da interação dipolar e a dependência da interação com o tamanho das amostras. Também são estudados sistemas de multicamadas com geometria de anéis e sistemas bifásicos. Os resultados apontam para uma descrição em detalhes dos estados a campo nulo e a identificação dos modos de reversão encontrados com base em simulações numéricas e em modelos analíticos. Com respeito a os sistemas estudados, não se aborda nem se discute seu uso potencial em gravação de informação.

[0006] Por outro lado, a publicação "Magnetismo of Nanoparticles: Effects of Size, Shape, and interactions" (Yury A. Koksharove, 2009) mostra a existência de efeitos de tamanho e de forma no estado magnético de um sistema. No entanto, esta verificação não conduz à proposição de uma forma particular que permita armazenar mais de um bit magnético. Nessa publicação só se descreve as características gerais da magnetização, sem referir-se aos estado fundamentais que permitam gravar informações em forma estável.

[0007] A publicação "Micromagnetics of Small Ferromagnetic Particles" (Nickolai A., Usov and Yury B. Grebenshchikov, 2009) assinala que os sistemas magnéticos apresentam configurações estáveis da magnetização. Estes correspondem a mínimos locais ou mínimos globais da energia. No entanto o texto só assinala sistemas nos quais os estados magnéticos estáveis são tais que permitam seu uso como um bit. Além disso, não se identificam geometrias que possam armazenar mais que um bit.

[0008] Uma das patentes que representa o estado da arte em sistemas afins é o documento **US2011037463** (2009), o qual apresenta um sistema de detecção de nanopartículas magnéticas, que também é usado para detectar moléculas, inclusive em uma configuração especial que permite o uso arranjos de moléculas que têm enlaçadas nanopartículas magnéticas. Se bem que apareçam vórtices e tenham uma zona retangular, isto não é indicativo de alguma relação direta entre esses sistemas e os estado magnéticos de sistemas retangulares. Ainda mais, essas características comumente existem em diversos sistemas magnéticos, embora não estejam precisamente relacionadas com estados magnéticos estáveis. Em relação à caracterização magnética, as curvas de magnetização não apresentam nenhuma forma similar àquelas que se observam em sistemas com a forma de T a partir de simulações.

[0009] O documento **RU2160697** (1998) menciona um método para poder desenvolver e produzir componentes para sistemas eletrônicos e engenharia elétrica. Em nenhuma parte se especifica as possíveis geometrias a serem adotadas, nem que comportamento magnético apresentam as diferentes que se poderia fabricar. Nesse documento não se faz referencia a geometrias retangulares.

[0010] O documento **US2011/0111259** (2011) está relacionado com a injeção de paredes de domínio, à interação entre elas e à possibilidade de mobilidade de tais paredes na presença de um campo externo aplicado. Seu comportamento magnético é similar ao de diversos tipos de simetria que estão presentes na literatura. No entanto, nessa configuração não se busca obter um estado magnético estável, nem explorar as possibilidades de transição entre os estados , apenas a interação e a manipulação das paredes de domínio.

[0011] O documento **WO2010011241** (2009) descreve um sistemas de nanopartículas postas sobre um substrato e que

apresentam variações em sua localização devido à presença de um campo magnético externo. No nosso caso, as partículas nas quais se grava a informação estão fixas e a informação pode ser gravada nos diferentes ordenamentos magnéticos (não posicionais) que a partícula apresenta. As variações na magnetização de um sistema de baixa simetria, como por exemplo com a forma de um T, se deve a diversas contribuições à energia que os momentos magnéticos da amostra apresentam. Isto não altera o ordenamento físico do material que constitui o sistema.

[0012] Portanto, com base em uma busca exaustiva na bibliografia, não se pode encontrar no estado da arte que partículas magnéticas com baixa simetria fossem candidatas à fabricação de meios de gravação com mais de um bit por elemento ou de dispositivos magnéticos de gravação quaternária ou maior.

Resumo da Invenção

[0013] O presente invento é um sistema formado por partículas ferromagnéticas de baixa simetria, com uma forte anisotropia configuracional, que apresentam diversas configurações magnéticas de equilíbrio. Assim, considera-se estruturas que são invariantes por quatro operações espaciais ao menos no plano da estrutura (plano xy na Figura 1). Este baixo número de operações de simetria, tais como rotações e reflexões, mantém inalterada a orientação espacial do sistema em consideração. Entre tais sistemas estão aqueles formados por segmentos ou barras ou por combinações destas, formando assim estruturas com distintas geometrias.

[0014] Estas estruturas se exemplificam em detalhes com o estudo de uma estrutura tipo T. Os resultados estão

descritos na seção seguinte. Baseado no método Monte Carlo (MC) foram desenvolvidos extensos cálculos numéricos que revelaram o aparecimento de estados de equilíbrio magnético bem definidos em tais partículas. A estabilidade dos estados de equilíbrio foi estimada a partir de cálculos de campos magnéticos necessários para passar de um desses estados a outro. Ademais, realizou-se uma análise da robustez dos resultados frente à presença de rugosidade.

[0015] Os sistemas considerados consistem em nano-elementos ferromagnéticos de baixa simetria, como ilustrado na Figura 1, para os quais extensas simulações revelaram a ocorrência de configurações magnéticas bastantes estáveis. Tais estruturas podem ser produzidas utilizando-se técnicas de nanolitografia e podem ser formadas por diferentes materiais ferromagnéticos tais como ferro, níquel, Permalloy ou outros, bem como por suas possíveis combinações e ligas.

[0016] Todos esses materiais têm suas temperaturas críticas (ou de Curie) acima da temperatura ambiente, à qual se espera que os dispositivos baseados nessas estruturas funcionem. A pronunciada estabilidade das configurações de equilíbrio nessas estruturas permitem o desenvolvimento de novos meios de armazenamento magnético.

Breve descrição das figuras

[0017] FIGURA 1: Representação esquemática de uma partícula com a forma de T, exemplo de sistema de baixa simetria.

[0018] FIGURA 2: Dependência angular da componentes normalizadas da magnetização m_x e m_y na direção do campo girante aplicado externamente.

[0019] FIGURA 3: Representação esquemática das quatro configurações de equilíbrio do sistema utilizado como exemplo.

[0020] FIGURA 4: Representação esquemática dos estados magnéticos com uma partícula com a forma de L.

Descrição detalhada da invenção

[0021] Os nanoelementos considerados são elementos de baixa simetria, tal como definido na presente invenção. Um exemplo de sistema proposto se apresenta na Figura 1. Este consiste em duas barras de ferro, uma paralela ao eixo x e outra ao eixo y, conectadas perpendicularmente na metade da segunda barra. Estas barra são denominadas "*horizontal (eixo x)*" e "*vertical (eixo y)*", respectivamente. As barras têm a mesma espessura, $t=10\text{ nm}$, e a mesma largura $w=40\text{ nm}$. O comprimento da barra horizontal e da barra vertical são $L_H = 210\text{ nm}$ e $L_V = 250\text{ nm}$, respectivamente.

[0022] Utilizando combinações de segmentos ou barras é possível se obter outros elementos similares aos do tipo T e que apresentam propriedades equivalentes. A Figura 4 mostra resultados para uma estrutura do tipo L, evidenciando que este tipo de estrutura permite armazenar mais de um bit por elemento.

[0023] As simulações a seguir se realizaram considerando que os átomos de que compõem o sistema são de ferro, representados cada um por um momento magnético de $\mu = 2,2\mu_B$, ordenados segundo uma estrutura cristalina tipo *bcc*, com uma constante de rede $a=0.28\text{ nm}$. A constante de intercâmbio J , que representa o acoplamento de troca entre os momentos magnéticos, foi adotada como tendo o valor de 40 meV . A energia do sistema para uma configuração de momentos magnéticos $\vec{\mu}_i$ é dada pela expressão

$$E = -\vec{H} \cdot \sum_i^N \vec{\mu}_i - J \sum_{\langle ij \rangle} \hat{\mu}_i \cdot \hat{\mu}_j + \sum_{i>j}^N \frac{\vec{\mu}_i \cdot \vec{\mu}_j - 3(\vec{\mu}_i \cdot \hat{n}_{ij})(\vec{\mu}_j \cdot \hat{n}_{ij})}{r_{ij}^3},$$

onde os subscritos $\langle ij \rangle$ indicam que a soma se realiza sobre os pares de vizinhos próximos, r_{ij} é a distância entre o i -ésimo e j -ésimo átomos e \hat{n}_{ij} é o vetor unitário ao longo da direção que conecta os i -ésimo e j -ésimo átomos. É importante mencionar que o número de momentos magnéticos nessas partículas é da ordem de 10^7 , número muito superior à quantidade de momentos magnéticos com a qual se pode realizar simulações Monte Carlo considerando interação dipolar. Com o propósito de superar essa dificuldade, se efetuou um procedimento que combina as simulações de Monte Carlo com a técnica de escalamento introduzida previamente para a obtenção de diagramas de fase de partículas magnéticas. Tal procedimento tem sido amplamente utilizado na literatura para investigar o comportamento magnético de partículas, obtendo-se resultados em excelente concordância com os dados experimentais. Este método consiste em escalar a constante J , o número de momentos magnéticos N presentes na amostra e a temperatura T à qual a partícula está submetida através das seguintes relações $J' = \xi J$, $N' = \xi^{3\eta} N$ e $T' = \xi^{3\eta} T$, onde ξ é a constante de escalamento, cujo valor está no intervalo $0 < \xi < 1$, e $\eta \approx 0.55$. Para um valor apropriado da constante de escalamento faz-se possível reduzir o tamanho do sistema a valores que possibilitem a realização de simulações de Monte Carlo (MC). No presente trabalho se considerou uma constante de escalamento $\xi = 0,002$, o que permite reduzir o número de momentos magnéticos presentes no sistema a $N' = 2072$.

[0024] Analisamos a resposta magnética do sistema a um campo H girante, de magnitude 4.0 kOe no plano x - y , o qual é suficiente para saturar a magnetização da partícula em qualquer direção no plano x - y . A orientação do campo magnético foi variada em passos de $\delta\theta = \pi/20$, onde θ é o ângulo entre o campo magnético aplicado e o eixo x . Para

cada valor do ângulo θ , o sistema foi mantido sob a ação do campo H por um período de tempo correspondente a 15.000 passos de Monte Carlo. A Figura 2 mostra as magnetizações normalizadas $m_x = M_x/M_0$ e $m_y = M_y/M_0$, onde M_0 é a magnetização de saturação, como função do ângulo θ .

[0025] Consideramos primeiramente os resultados para $\theta = \pi/4$. Neste caso encontrou-se que $m_x = m_y$, o que significa que a magnetização aponta no plano $x-y$ na direção correspondente à configuração (a) na Figura 2. A medida em que o ângulo θ aumenta, observa-se um decréscimo gradual em m_x e um crescimento gradual em m_y . Logo observa-se uma rápida variação de m_x , mudando o seu sinal. Isto é consistente com o sistema passar da configuração (a) à configuração (b) na Figura 3, onde m_x é negativo e m_y é positivo. Um subsequente incremento no ângulo θ resulta em uma redução gradual de ambas as componentes até que o ângulo θ ultrapasse π . Ocorre então uma rápida variação em m_y , mudando o seu sinal de positivo para negativo. Tal comportamento é consistente com a passagem do sistema da configuração (b) para a (c), mostrada na Figura 3. Ambas as componentes permanecem negativas até que o ângulo θ ultrapasse $3\pi/2$, quando o sinal de m_x passa de valores negativos para positivos, indicando a passagem do sistema da configuração (c) para a (d). Finalmente, quando θ ultrapassa 2π , m_y passa rapidamente a valores positivos, levando o sistema à configuração (a).

[0026] As variações rápidas nas componentes da magnetização quando o sistema passa de uma configuração a outra assinala a ultrapassagem de barreiras de energia que separam os estados. A magnitude relativa dessas barreiras é estimada determinando-se o valor mínimo do campo magnético que leva o sistema de uma configuração inicial (i) a uma configuração final (f). O processo ocorre como descrito a

seguir. O sistemas inicialmente na configuração (i) é submetido a um campo magnético na direção definida pela configuração (f) e é mantido nessas condições por 2.000.000 passos de Monte Carlo. O campo é então removido e o sistema é deixado relaxar por outros 2.000.000 passos. Se após este processo o sistema retornar à configuração (i), a intensidade do campo magnético é incrementada e todo o processo é repetido até que o sistema termine na configuração (f).

[0027] Seguindo tal procedimento, determina-se o campo magnético H_t associado às transições entre todos os pares de estados representados na Figura 3. Destacamos que por questão de simetria, algumas transições são equivalentes. Os resultados em unidades de kOe estão resumidos na tabela 1.

Transición	H_t
a \leftrightarrow b c \leftrightarrow d	1.36 ± 0.01
a \leftrightarrow c b \leftrightarrow d	1.50 ± 0.01
a \leftrightarrow d b \leftrightarrow c	1.39 ± 0.01

Tabela 1. Campo magnético H_t associados às transições entre os estados na Figura 3, em unidades de kOe.

[0028] A magnitude dos campos de transição na Tabela 1 indica as quatros configurações de equilíbrio são bastante estáveis, o que é altamente relevante sob o ponto de vista de armazenamento de informação. A estabilidade das quatro configurações é resultado da forte anisotropia

configuracional associada à redução da simetria das partículas em forma de T.

[0029] Quanto à avaliação da robustez dos resultados frente à presença de rugosidade superficial, que pode estar presente em sistemas reais, adotamos o seguinte procedimento: removemos 3% dos momentos magnéticos da superfície e os posicionamos aleatoriamente sobre a superfície. Isto equivale a introduzir no sistema cerca de 6% de rugosidade superficial. Em seguida, submetemos a partícula a um campo magnético girante e observamos o comportamento de m_x e de m_y como funções do ângulo de rotação. Os resultados são praticamente indistinguíveis dos obtidos na Figura 2. Em seguida, obtivemos os campos de transição para o sistema com rugosidade superficial, que se mostraram bastantes similares aos sem rugosidade, como se exemplifica na Tabela II.

Transición	H_t con rugosidad
$a \Leftrightarrow b$	1.37 ± 0.08
$a \Leftrightarrow c$	1.41 ± 0.08
$a \Leftrightarrow d$	1.37 ± 0.08

[0030] Tabela II. Campos de transição correspondentes à transição entre estados na Figura 3 na presença de rugosidade superficial. Os resultados estão em kOe.

[0031] Em conclusão, encontramos quatro estados magnéticos de equilíbrio em partículas de baixa simetria com a forma de um T. Sistemas similares, como os do tipo L apresentam propriedades equivalentes, permitindo armazenar um número maior de bits por elemento.

[0032] A estabilidade de tais estados foi estudada mediante o cálculo da intensidade dos campos magnéticos que podem modificar o estado do sistema tipo T, permitindo ao sistema passar de uma configuração a outra.

[0033] Os resultados indicam que tais estados são estáveis, como consequência da forte anisotropia configuracional presente no sistema, o que é altamente interessante sob o ponto de vista de aplicações tecnológicas. Por último, como se observa comparando as tabelas I e II, a presença de rugosidade superficial não produz desvios significativos com relação aos campos necessários para modificar os estados. Assim o sistema se mostra altamente estável.

REVINDICAÇÕES

1. Meio de armazenamento magnético de alta densidade, **CARACTERIZADO** porque está provido de partículas ferromagnéticas de baixa simetria formadas por segmentos ou barras, ou por sistemas de barras y combinações destas, que formam estruturas com diferentes geometrias.
2. Meio de armazenamento segundo a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** porque está formado pela união de barras ou segmentos magnéticos, gerando estruturas que são invariantes a quatro operações de simetria espaciais no plano da estrutura ou menos.
3. Meio de armazenamento segundo a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** porque as partículas estão compostas por algum material ferromagnético como o ferro, cobalto, níquel, Permaloy ou outros, e todas suas possíveis combinações ou ligas.
4. Meio de armazenamento segundo às reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** porque tal meio pode ser um sensor magnética ou elemento de memória magnética.
5. Meio de armazenamento segundo as reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** porque tal meio para o armazenamento de informação pode originar um sistema lógico magnético, representado os zeros e os uns de um sistema binário mediante os estados de equilíbrio da magnetização da estrutura.
6. Meio de armazenamento segundo as reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** porque tais sistemas de barras têm estados estáveis da magnetização.
7. Meio de armazenamento segundo as reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** porque tais sistemas de barras, embora apresentando rugosidade, apresentam estados estáveis da magnetização.

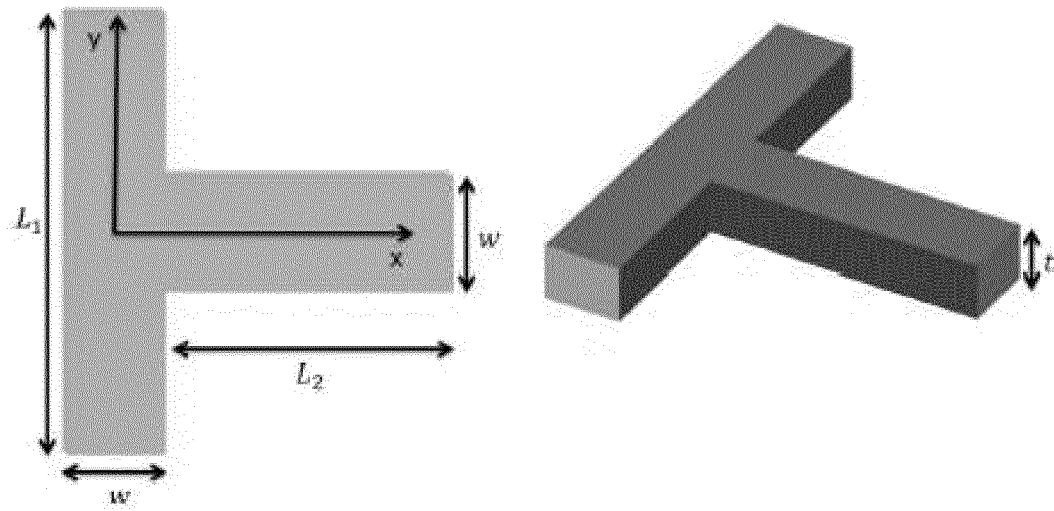
FIGURAS

Figura 1

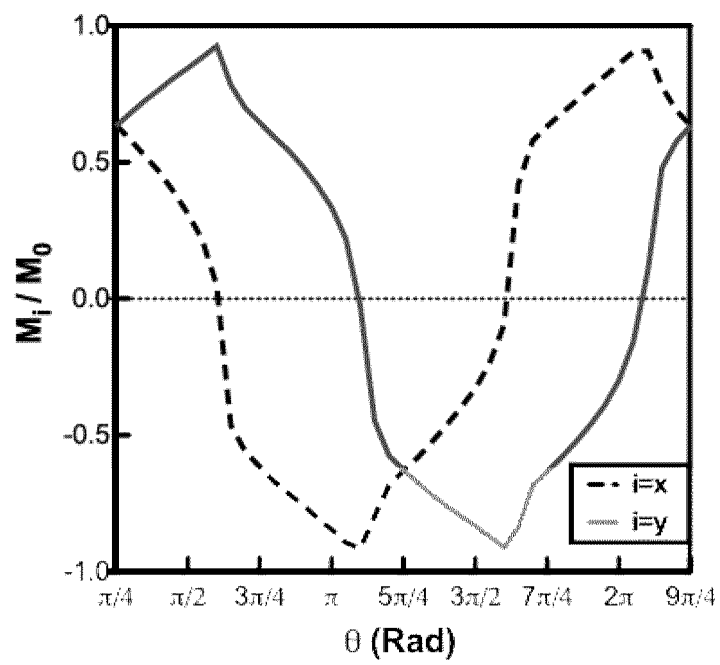


Figura 2

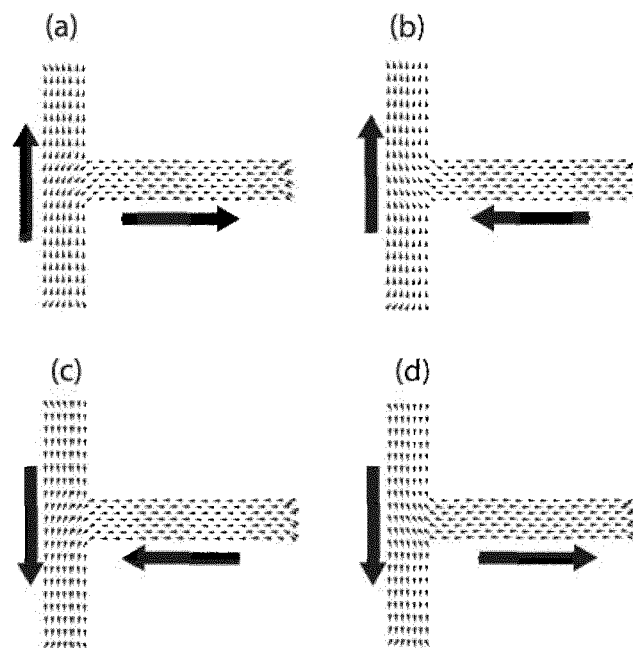


Figura 3

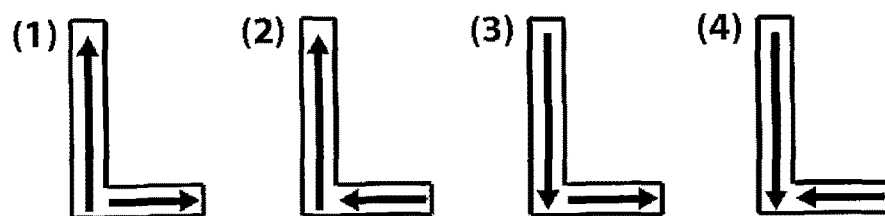


Figura 4

RESUMO

MEIO DE ARMAZENAMENTO MAGNÉTICO DE ALTA DENSIDADE

Meio de armazenamento magnético de alta densidade constituído por partículas ferromagnéticas de baixa simetria, nos quais as partículas são formadas por segmentos ou barras, ou por sistemas de barras e combinações destas, que foram estruturas com diferentes geometrias.